

ОБЪЕМНЫЕ И СДВИГОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССЕ СОВМЕЩЕННОГО КОМПАКТИРОВАНИЯ И ПРЕССОВАНИЯ

VOLUME AND SHIFT STRAINS IN THE COURSE OF THE COMBINED PRESSING AND EXTRUSION

Логинов Ю.Н.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, unl@mtf.ustu.ru

Bulk and shear deformation during a combination of compaction and extruding ring blanks from granulated material investigated.

В отличие от магнитно-мягких материалов магнитно-твердые материалы характеризуются высокой энергией перемангничивания. Современные представления о характере протекания процессов намагничивания и перемангничивания включают дислокационную теорию коэрцитивной силы, которая связывает коэрцитивную силу с плотностью дефектов кристаллической решетки материала, например, в соответствии со следующей формулой

$$H_c = k \cdot \lambda_s \cdot \frac{b \cdot G}{I_s} \sqrt{\rho_d},$$

где λ_s - магнитоstriction насыщения; b - вектор Бюргерса; G - модуль сдвига; I_s - намагниченность насыщения; ρ_d - плотность дефектов, например, дислокаций; k - размерный множитель.

Анализ формулы говорит о том, что важнейшее магнитное свойство - коэрцитивная сила, - напрямую зависит от плотности дислокаций. Современная теория пластической деформации металлов также базируется на предположении, что пластическое течение осуществляется, как правило, за счет зарождения, перемещения, размножения и аннигиляции дислокаций. Таким образом, роль пластической деформации в формировании или улучшении магнитных свойств материалов несомненна.

Основанием для разработки нового процесса деформации послужило следующее обстоятельство. Один из магнито жестких материалов - сплав Mn-Al-C желательно производить из гранулированного материала, что позволяет использовать эффект закалки в полной мере, поскольку переохлаждению подвергаются мелкие и термически тонкие образования.

При формировании высококоэрцитивного состояния сплава Mn-Al-C роль пластической деформации резко возрастает, поскольку магнитные свойства этого сплава существенно могут быть улучшены созданием текстуры деформации. Естественно, что направление

наилучших характеристик должно соответствовать потребительским запросам, которые могут оказаться различными. Формирование наилучших магнитных свойств в этом сплаве происходит в направлении оси удлинения, а острота текстуры определяется величиной деформации удлинения и схемой деформированного состояния. Последнюю удобно анализировать с помощью параметра Надаи-Лоде, записывая его через компоненты тензора деформации:

$$\mu_\varepsilon = 2 \cdot \frac{\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{33}} - 1,$$

где ε_{ii} ($i=1,2,3$) - главные компоненты тензора деформации. С целью достижения наиболее острой магнитной текстуры следует добиваться в заданном направлении наибольших по модулю значений компоненты ε_{33} .

Для получения текстурованных магнитов предложена следующая схема деформации. В контейнер 1 (рис.1) аксиально помещают цилиндрическую заготовку 2 из пластичного металла (меди). Нижний торец заготовки перекрывает отверстие матрицы 3, установленной в контейнере. В кольцевой зазор между стенкой контейнера и заготовкой засыпают гранулы 4. Дальнейшую совместную деформацию гранул и сердцевинки осуществляют перемещением пуансона 5, в результате чего сердечник с начальным диаметром $d=2 \cdot R_0$ и высотой h_0 подвергается осадке и сжимается в радиальном направлении гранулы. На кольцевой слой действуют одновременно как напряжения в радиальном направлении из-за увеличения диаметра сердечника, так и осевые напряжения сжатия со стороны торца пуансона. Поэтому напряженное состояние порошкового тела близко к гидростатическому сжатию, что облегчает его уплотнение.

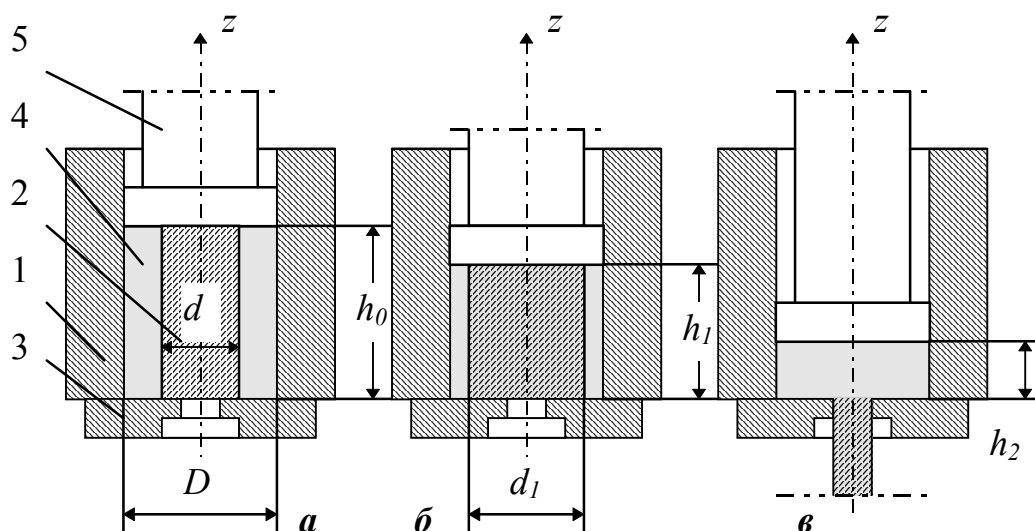


Рис. 1. Схема получения магнитной текстуры одновременным компактированием и деформацией кольцевой заготовки в контейнере: 1 - контейнер; 2 - медная заготовка; 3 - матрица; 4 - гранулы магнитного сплава; 5 - пуансон; а - положение до деформации; б - положение при уплотнении; в - окончание выдавливания меди

На первом этапе напряжения на нижнем торце заготовки относительно малы и не могут вызвать течение сердечника в отверстие матрицы. В таком режиме осуществляется компактирование кольцевой заготовки с утонением ее стенки при изменении ее плотности от насыпной ρ_0 до близкой к плотности компактного металла ρ_k , при этом диаметр сердечника увеличивается до значения $d=2R_1$, а высота уменьшается до величины h_1 . На второй стадии происходит истечение материала сердцевинки через отверстие матрицы. При этом для уплотненного материала заготовки характерно радиальное течение металла к центру, что создает радиальную текстуру. При достаточно больших напряжениях материал сердцевинки может быть выдавлен полностью, а высота заготовки станет равной h_2 .

Важным вопросом является определение начальных размеров сердечника для обеспечения необходимых параметров деформации. Для первого этапа деформации запишем условие постоянства объема для сердечника

$$\pi \cdot d^2 \cdot h_0 / 4 = \pi \cdot d_1^2 \cdot h_1 / 4 \quad (1)$$

и условие постоянства массы для кольцевой заготовки

$$\pi \cdot h_0 \cdot \rho_0 \cdot (D^2 - d^2) / 4 = \pi \cdot h_1 \cdot \rho_k \cdot (D^2 - d_1^2) / 4 \quad (2)$$

Для второго этапа деформации запишем условие постоянства объема при условии полной трансформации кольцевой заготовки в цилиндрическую заготовку без полости и неизменности ее плотности

$$\pi \cdot h_1 \cdot (D^2 - d_1^2) / 4 = \pi \cdot h_2 \cdot D^2 / 4 \quad (3)$$

Для второго этапа характерно также требование обеспечения необходимой высотной деформации ε для получения необходимых магнитных свойств: $\varepsilon_h = (h_1 - h_2) / h_1$.

откуда $h_1 = h_2 / (1 - \varepsilon_h)$.

При заданных величинах h_2 и D можно определить величину d_1 по формуле

$$d_1 = D \cdot \sqrt{1 - h_2 / h_1} = D \sqrt{\varepsilon_h}.$$

Предыдущие выражения образуют систему уравнений, при этом следует, что

$$h_0 / h_1 = d_1^2 / d^2, \quad (4)$$

из чего следует запись

$$d = \frac{D}{\sqrt{1 + (D^2 / d_1^2 - 1) \rho_k / \rho_0}} = \frac{D}{\sqrt{1 + (1 / \varepsilon_h - 1) \rho_k / \rho_0}}. \quad (5)$$

Вернувшись к рассмотрению равенства (2), запишем

$$h_0 = h_1 \left[\varepsilon_h + (D^2 / d_1^2 - 1) \rho_k / \rho_0 \right] = h_2 \left[\varepsilon_h / (1 - \varepsilon_h) + \rho_k / \rho_0 \right]. \quad (6)$$

Последние формулы позволяют определить исходные размеры сердечника. Так, при начальных данных $\varepsilon_h=0,8$ и $\rho_k/\rho_0=2$ получим $h_0/h_2=6$; $d/D=0,82$. Вместе с тем, из последних записей следует формула для определения степени обжатия

$$\varepsilon_h = \frac{1}{1 + \frac{\rho_0}{\rho_k} \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right)}, \quad (7)$$

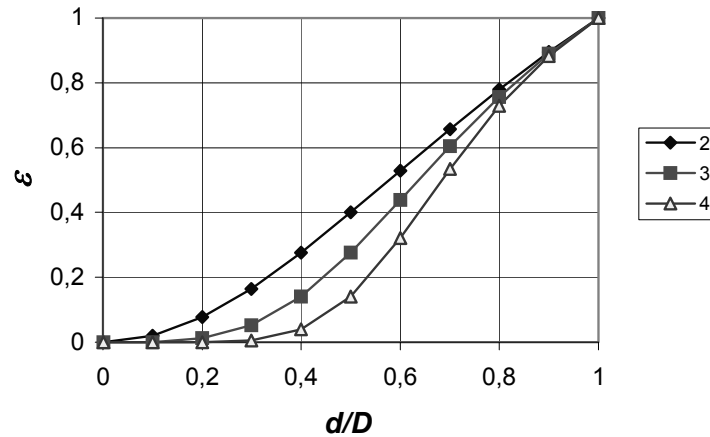


Рис.2. Зависимость степень деформации от относительного диаметра сердечника при фиксированных отношениях ρ_k/ρ_0

Для оценки распределения плотности получаемой кольцевой заготовки рассмотрим ту же схему деформации и примем, что подвижный пунсон перемещается со скоростью v . Разница в свойствах гранулируемой среды (объем 1) и монолитной заготовки (объем 2) обуславливает специфику совместного течения среды в целом.

Сформулируем кинематические граничные условия. Из условия симметрии следует формула для радиальной компоненты скорости (индексы 1 и 2 соответствуют номеру объема) $v_{r2}|_{r=0} = 0$. Вместе с тем по высоте заготовки осевая компонента скорости определится так: $v_z|_{z=0} = 0$, $v_z|_{z=h} = -v$, что выполняется и для объема 1 и для объема 2. Кроме того $v_{r1}|_{r=R} = 0$.

Допустим также, что на границе раздела объемов 1 и 2 разрыв нормальной компоненты отсутствует, т.е. $v_{r1}|_{r=R1} = v_{r1}|_{r=R2}$, тогда подходящее поле скоростей перемещений и скоростей деформаций, удовлетворяющее приведенным выше граничным условиям, можно записать так. Для объема 1 компонента тензора скорости деформации определится как

$$\xi_{zz1} = \partial v_z / \partial z = -v/h; \quad (8)$$

из условия несжимаемости

$$\xi_2 = \xi_{zz2} + \xi_{rr2} + \xi_{\varphi\varphi2} = -0,5 \cdot \frac{v}{h} \cdot \left(1 - \frac{R_1}{R - R_1} - \frac{R - r}{R - R_1} \cdot \frac{R_1}{r} \right) \quad (15)$$

в соответствии с которой построен график рис.2. Из выражения (7) следует, что степень деформации не зависит от начальной высоты заготовки, которая определяет лишь длину получаемого после деформации полуфабриката.

$$\xi_{rr1} = \xi_{\varphi\varphi1} = 0,5 \cdot v/h; \quad (9)$$

$$v_{r1} = 0,5 \cdot r \cdot v/h. \quad (10)$$

Для объема 2 можно записать

$$v_{r2} = 0,5 \cdot R_1 \cdot v/h \cdot \frac{R - r}{R - R_1}; \quad (11)$$

$$\xi_{zz2} = \partial v_z / \partial z = -v/h, \quad (12)$$

а также

$$\xi_{rr2} = -0,5 \cdot v/h \cdot \frac{R_1}{R - R_1}; \quad (13)$$

$$\xi_{\varphi\varphi2} = 0,5 \cdot v/h \cdot \frac{R - r}{R - R_1} \cdot \frac{R_1}{R}. \quad (14)$$

В отличие от объема 1 скорость изменения объема (уплотнения) 2 не равна нулю и определяется соотношением

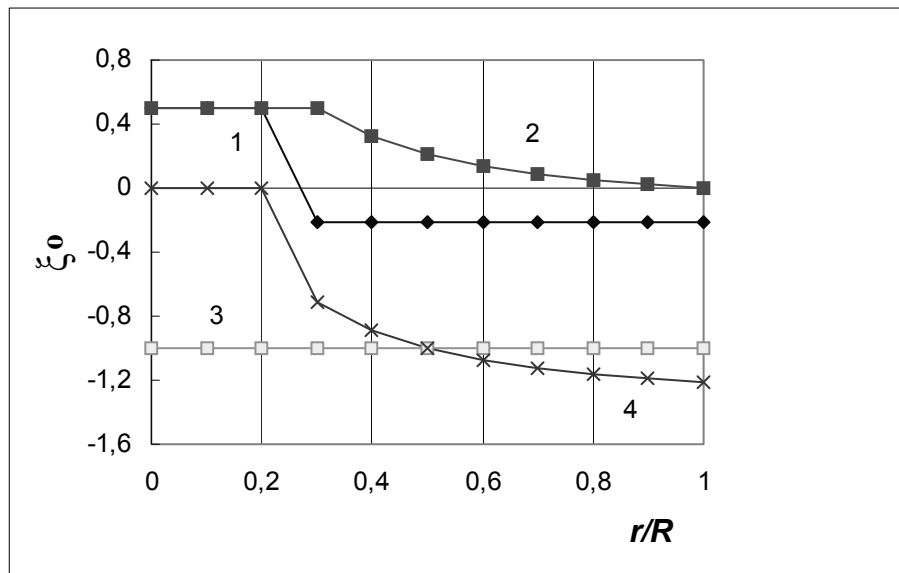


Рис.3. Кинематические соотношения в различных объемах заготовки:

1 - ξ_{rr}^0 ; 2 - $\xi_{\theta\theta}^0$; 3 - ξ_{zz}^0 ; 4 - ξ^0 при $R_n/R=0,3$

По полученным соотношениям построены эпюры распределения компонентов тензора скоростей деформации по радиальной координате (рис.3), при этом введены безразмерные величины

$$\xi^0_{ii} = \xi_{ii} / (v / h).$$

Из анализа графиков следует, что стадия уплотнения сопровождается неблагоприятным для формирования текстуры распределением знаков деформаций: тангенциальная деформация - удлинения, а осевая и радиальная - деформации укорочения. Однако по завершении стадии уплотнения и начале истечения металла из первой зоны через отверстие матрицы ситуация коренным образом меняется: происходит осадка полой заготовки с подпором со стороны материала сердцевины. Вследствие этого текстура деформации получается радиальной и острой.

Опытное прессование гранул магнитного сплава фракций 0,16...1,0 мм выполняли из кольцевого зазора, образованного отверстием контейнера диаметром 15,15мм и медной 20мм вставки диаметром 8мм. Сборку подвергали холодной подпрессовке усилием 100кН, нагревали до 720⁰С и продавливали через отверстие матрицы диаметром 3,5мм. Перемещение пуансона составило 9,5мм при нагрузке 80кН (напряжение 440МПа) в течение 8 мин, в результате был выдавлен медный пруток длиной 39мм. Заготовку разрезали в продольном направлении и получили темплет, на котором удалось оценить поведение границы медь - магнитный сплав. Выявили, что диаметр границы в верхней части заготовки на 25% меньше диаметра границы в нижней части, что указывает на наличие своеобразной мертвой зоны вблизи отверстия матрицы.

Сам способ деформации следует считать приемлемым для получения магнитов из гранулированного сплава Mn-Al-C.